

УДК 621.382.2:621.3.083

**ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ ХАОС В RL-ДИОДНЫХ ЦЕПЯХ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В МЕТРОЛОГИИ**В.Ю.Кучерук<sup>1</sup>, И.П.Куритник<sup>2</sup>, Д.Ж.Карабекова<sup>3</sup><sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет, Винница, Украина<sup>2</sup>Гуманитарно-техническая академия, Бельско-Бяла, Польша<sup>3</sup>Карагандинский государственный университет им. академика Е.А. Букетова, Караганда, Казахстан

Усложнение технологических процессов приводит к необходимости определения большого количества параметров и физических величин, при этом значительно возрастает роль измерений. Автоматизация сложных производственных процессов связана с применением различных измерительных преобразователей, обеспечивающих получение оперативной измерительной информации в надлежащем объеме и эффективное управление технологическим процессом. Наиболее распространенными являются параметрические резистивные измерительные преобразователи физических величин (контактного сопротивления, фоторезистивные, электрохимические резистивные, терморезистивные, тензорезистивные).

Во многих из них для обеспечения необходимых для практики метрологических характеристик (разрешающей способности, в частности) необходимо преобразовывать достаточно малые изменения выходного сопротивления. Это в свою очередь приводит к усилению случайных помех на полезный сигнал, в результате чего увеличивается случайная погрешность измерений. Поэтому повышение чувствительности резистивных измерительных преобразователей с одновременным обеспечением низкого уровня случайных шумов является актуальной задачей.

Значительным научным открытием последних десятилетий является открытие детерминированного хаоса в динамических системах [1]. Суть этого открытия заключается в том, что полностью определенная (детерминированная) динамическая система, при отсутствии каких-либо случайных воздействий на нее, начинает вести себя непредсказуемым (хаотическим) образом. Однако в этой непредсказуемости (хаотичности) при более тщательном рассмотрении удастся выявить ряд закономерностей в поведении системы, отличает данное явление от классических случайных процессов.

Несмотря на хаотичный характер, когда на практике предсказать состояние системы в заданный момент времени можно только статистически, процесс в таких системах существенно отличается от обычного статистического шума. Последний характеризуется тем, что точки траектории равномерно заполняют определенный объем фазового пространства, а сплошной спектр шума не имеет четко выраженных линий. Фазовые портреты систем с детерминированным хаосом обладают сложной неравномерной пространственной структурой и некоторыми общими свойствами, причем в непрерывном спектре присутствуют явно выраженные гармоники. К фундаментальным свойствам таких систем относится чрезвычайно высокая чувствительность хаотического процесса к изменению внутренних параметров генератора детерминированного хаоса (ГДХ).

Рассмотрим метод измерения физических величин, в основу которого положено использование ГДХ. В его основе лежит использование в качестве измерительной цепи нелинейной электрической схемы в режиме детерминированно-хаотических колебаний. Сенсор измерительной физической величины подключается к схеме ГДХ таким образом, чтобы его исходное значение меняло значение одного из параметров ГДХ. Измерительной информацией в данном методе является реализация хаотического процесса, снимаемая с ГДХ, которая далее поступает на обработку в вычислительный блок [2-4].

Для получения оценки параметра генератора ХК можно использовать любую устойчивую характеристику структуры системы с детерминированным хаосом (амплитуду колебаний по всем переменным фазового пространства, размерность Хаусдорфа, энтропию Колмогорова, показатели Ляпунова, среднее время предсказуемости хаотической системы и т.д.) [4]. Алгоритм определения значения физической величины заключается в получении по снятой хаотичной реализации числовой оценки выбранной характеристики.

Средство измерения, созданный на базе ГДХ, будет иметь функцию преобразования в виде зависимости характеристики аттрактора ГДХ от измеряемой физической величины (так как она однозначно определяется параметром ГДХ). Основным преимуществом данного метода является возможность построения на его основе средств измерения, более чувствительных по сравнению с существующими. Метод пригоден для измерения любой физической величины, если существует сенсор этой величины с выходным сигналом в виде электрического напряжения или тока, а также параметрические сенсоры,

в которых измеряемая физическая величина преобразуется в соответствующее изменение сопротивления, емкости или индуктивности.

На рис. 1 представлена обобщенная структурная схема измерительного устройства на базе ГДХ, состоящая из двух частей: ГДХ, к которому подключен сенсор измеряемой физической величины, и вычислительного устройства, в котором реализованы алгоритмы определения параметра ГДХ.

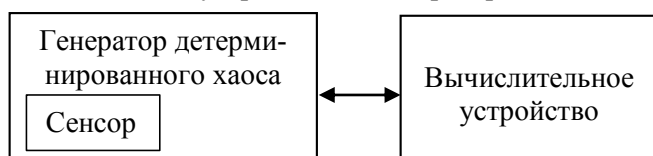


Рис. 1 – Обобщенная структурная схема измерительного устройства на основе ГДХ

Сенсор измеряемой физической величины подключается к измерительной схеме ГДХ таким образом, чтобы его выходная величина меняла один из параметров ГДХ. Из ГДХ хаотический сигнал поступает на вход вычислительного устройства, где определяется отклонение определенного параметра ГДХ и на основе заложенной градуированной характеристики

вычисляется значение измеряемой физической величины.

При выборе практической реализации ГДХ нужно учесть ряд обстоятельств: простота реализации, наличие диапазона изменения параметров, которые обеспечивают хаотический режим, наличие математической модели, которая позволяет достаточно просто моделировать хаотичный процесс.

В качестве дальнейшего объекта исследования выбран ГДХ на основе высокочастотной RL-диодной цепи, приведенный на рис. 2 [5]. Это неавтономный генератор, так как схема, состоящая из линейной RL-цепи, соединена последовательно с диодом D и источником переменного напряжения. В этой простой системе возникновение нелинейных хаотических колебаний определяется параметрами цепи.

Осуществим анализ причин и условий возникновения хаотических колебаний в RL-диодной цепи [6]. Для этого сначала рассмотрим схему замещения диода [7]. Схема замещения диода в режиме малого сигнала (в наиболее общем случае) представлена на рис. 3. Согласно этой схеме диод представляет собой параллельное соединение нелинейного резистора  $R_d$  и двух нелинейных ёмкостей – барьерной  $C_j$  и диффузионной  $C_d$ . Барьерная ёмкость определяется по формуле

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\left(1 - \frac{U}{U_D}\right)^n}, \quad (1)$$

где  $C_{j0}$  – барьерная ёмкость при нулевом напряжении диода;  $U$  – напряжение диода;  $U_D$  – диффузионное напряжение диода;  $n$  – технологический коэффициент, лежащий в диапазоне  $\left(\frac{1}{3} \dots \frac{2}{3}\right)$ .

Диффузионная ёмкость определяется как

$$C_d = \frac{\tau_B I_S}{m U_T} \exp\left(\frac{U}{m U_T}\right), \quad (2)$$

где  $I_S$  – тепловой ток диода;  $\tau_B$  – время жизни неосновных носителей заряда;  $U$  – напряжение диода;  $U_T$  – тепловое напряжение диода;  $m$  – коэффициент эмиссии.

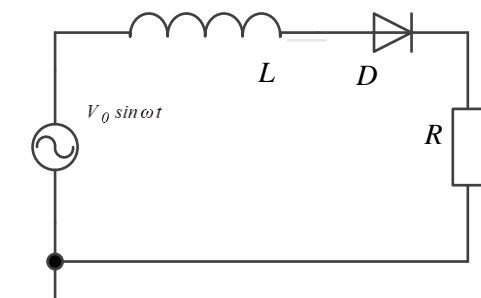


Рис. 2. Схема генератора детерминированно-хаотических колебаний на основе RL-диодной цепи

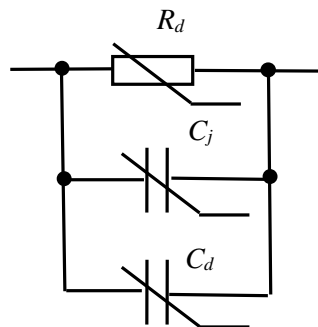


Рис. 3. Схема замещения диода в режиме малого сигнала

Следует отметить, что в режиме прямого напряжения при  $U \geq U_D$  барьерной ёмкостью можно пренебречь. В режиме обратного напряжения можно пренебречь диффузионной ёмкостью.

Рассмотрим процессы, происходящие в  $RL$ -диодной электрической цепи (рис. 4), при подаче на её вход синусоидального напряжения. В наиболее общем случае схема замещения этой цепи изображена на рис. 5. Эта цепь содержит сразу три нелинейных элемента: резистор  $R_d$ , барьерную ёмкость  $C_j$  и диффузионную ёмкость  $C_d$ . При этом, сопротивление резистора зависит от тока диода, а ёмкости зависят от напряжения диода.

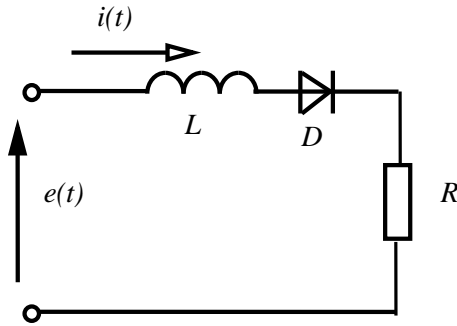


Рис. 4.  $RL$ -диодная электрическая цепь синусоидального тока

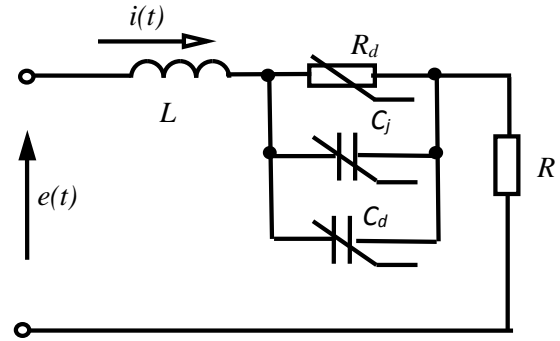


Рис. 5. Схема замещения  $RL$ -диодной электрической цепи синусоидального тока

Составим систему уравнений по законам Кирхгофа для схемы, показанной на рис. 5. При этом будем считать, что по резистору  $R_d$  протекает ток  $i_1$ , по ёмкости  $C_j$  –  $i_2$ , а по ёмкости  $C_d$  –  $i_3$ . Так как напряжение на ёмкостях одинаковое, обозначим его  $U_C$ .

$$\begin{cases} i = i_1 + i_2 + i_3; \\ L \frac{di}{dt} + Ri + R_d(i_1)i_1 = e; \\ R_d(i_1)i_1 = U_C; \\ i_2 = C_j(U_C) \frac{dU_C}{dt}; \\ i_3 = C_d(U_C) \frac{dU_C}{dt}. \end{cases} \quad (3)$$

Отсюда следует

$$i_1 = \frac{U_C}{R_d(i_1)}; \quad i = \frac{U_C}{R_d(i_1)} + C_j(U_C) \frac{dU_C}{dt} + C_d(U_C) \frac{dU_C}{dt},$$

и, наконец,

$$\begin{aligned} & L \frac{d \left( \frac{U_C}{R_d(i_1)} + C_j(U_C) \frac{dU_C}{dt} + C_d(U_C) \frac{dU_C}{dt} \right)}{dt} + R \left( \frac{U_C}{R_d(i_1)} + C_j(U_C) \frac{dU_C}{dt} + C_d(U_C) \frac{dU_C}{dt} \right) + U_C = \\ & = \frac{L}{R_d(i_1)} \frac{dU_C}{dt} + LC_j(U_C) \frac{d^2 U_C}{dt^2} + LC_d(U_C) \frac{d^2 U_C}{dt^2} + \frac{R}{R_d(i_1)} U_C + RC_j(U_C) \frac{dU_C}{dt} + RC_d(U_C) \frac{dU_C}{dt} + U_C = e. \end{aligned}$$

После приведения подобных членов получим окончательное выражение для дифференциального уравнения второго порядка, которому подчиняется режим работы вышеприведенной электрической цепи

$$(LC_j(U_C) + LC_d(U_C)) \frac{d^2 U_C}{dt^2} + \left( \frac{L}{R_d(i_1)} + RC_j(U_C) + RC_d(U_C) \right) \frac{dU_C}{dt} + \left( \frac{R}{R_d(i_1)} + 1 \right) U_C = e. \quad (4)$$

Выполним решение этого дифференциального уравнения операторным способом в общем виде. Операторное уравнение 2-го закона Кирхгофа для этой цепи имеет вид

$$I(s)(R + sL + Z_d(s)) = E(s), \quad (5)$$

где  $Z_d(s)$  – полное операторное сопротивление схемы замещения диода, которое определяется как

$$Z_d(s) = \frac{R_d(i_1) \frac{1}{sC_j(U_C)} \frac{1}{sC_d(U_C)}}{R_d(i_1) \frac{1}{sC_j(U_C)} + R_d(i_1) \frac{1}{sC_d(U_C)} + \frac{1}{sC_j(U_C)} \frac{1}{sC_d(U_C)}}.$$

Тогда операторное изображение тока цепи находится по формуле

$$I(s) = \frac{E(s)}{(R + sL + Z_d(s))}. \quad (6)$$

Очевидно, что из-за существенной нелинейности  $Z_d(s)$ , в общем виде невозможно получить оригинал тока цепи  $i(t)$ . Поэтому, решим задачу в численном виде для одного из типов диодов и конкретных значений  $e(t)$ ,  $R$ ,  $L$ . Пусть:  $e(t) = 3 \sin(\omega t)$  [В],  $f = 10$  [кГц],  $L = 50$  [мГн],  $R = 2$  [кОм], тип диода – 1N457.

Учитывая, что параметры диода существенно отличаются для прямого и обратного напряжения, анализ режима цепи проведем модифицированным методом кусочно-линейной аппроксимации с помощью переходных характеристик и интеграла Дюамеля.

Итерационный алгоритм расчета можно сформулировать так:

1. Разбиваем кривую входного синусоидального напряжения на одинаковые временные интервалы и каждому из них соотносим определенные участки вольт-амперной характеристики диода (т.е.  $R_d$ ) и определенные значения  $C_j$  и  $C_d$ .

2. Для каждого линеаризованного участка вольт-амперной диода характеристики и значений  $C_j$  и  $C_d$  операторное изображение переходной характеристики цепи по отношению к её току определяется как

$$h_i(s) = \frac{\frac{1}{s}}{(R + sL + Z_d(s))} = \frac{1}{s(R + sL + Z_d(s))}. \quad (7)$$

3. Вычисляем оригинал переходной характеристики  $h_i(t)$ .

4. Вычисляем величину тока в конце каждого временного интервала при помощи интеграла Дюамеля по формуле

$$i(t_k) = i(t_{k-1}) + \int_{t_{k-1}}^{t_k} \frac{de(\tau)}{d\tau} h_k(t - \tau) d\tau. \quad (8)$$

5. Определяем напряжение диода по приближенной формуле

$$u_{dk} = u(t_{k-1}) - \left( L \frac{i(t_k) - i(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}} + i(t_k) R \right), \quad (9)$$

после чего уточняем параметры  $R_d$ ,  $C_j$  и  $C_d$ .

6. Возвращаемся на 2-й пункт алгоритма и повторяем расчет до тех пор, пока значение  $u_{dk}$  почти не будет отличаться от предыдущей итерации. По результатам расчета была построена зависимость  $U2=f(U1)$ , где  $U2=IR$ .

График этой зависимости изображен на рис. 6. Из этого графика видно, что при вышеприведенных параметрах схемы ее режим представляет собой хаотические колебания. Были также проведены расчеты режима цепи, при других значениях индуктивности и частоты, с целью оценить влияние этих параметров на характер хаотических колебаний. Графики зависимостей  $U2=f(U1)$  показаны, соответственно, на рис. 7-8.

Анализ аттракторов, представленных на рис. 6-8 показывает, что в  $RL$ -диодных цепях синусоидального тока, если период колебаний соизмерим с постоянной времени переходного процесса, может возникнуть ситуация, когда в конце периода ток в цепи не затухает до нуля и новый период начинается с ненулевых начальных условий. При этом, вследствие существенной нелинейности параметров схемы замещения диода, в цепи имеет место практически незатухающий переходный процесс, который приобретает форму хаотических колебаний. При увеличении индуктивности цепи размах аттрактора увеличивается. В случае увеличения частоты входного напряжения наблюдается тенденция некоторого смещения аттрактора в направлении отрицательных напряжений.

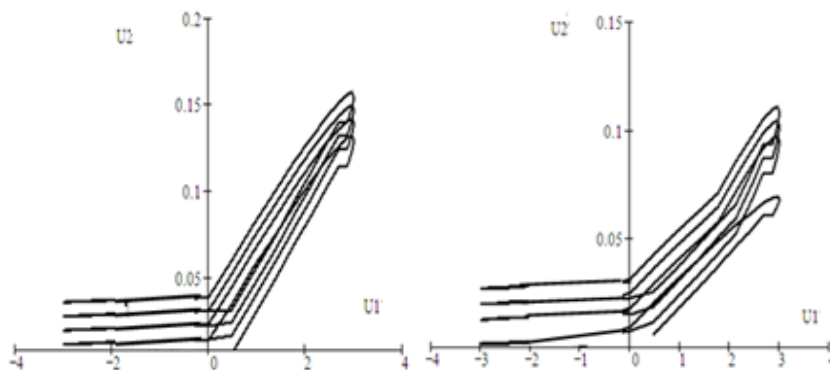


Рис. 6. График зависимости  $U_2=f(U_1)$ , при  $f = 10$  [кГц],  $L = 50$  [мГн],  $R = 2$  [кОм]

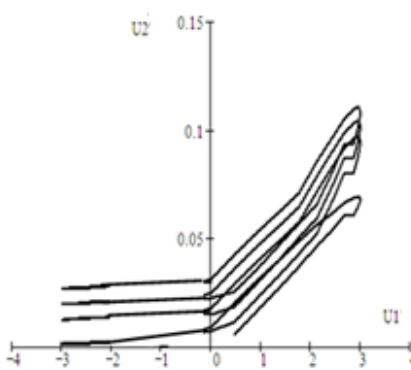


Рис. 7. График зависимости  $U_2=f(U_1)$ , при  $f = 10$  [кГц],  $L = 100$  [мГн],  $R = 2$  [кОм]

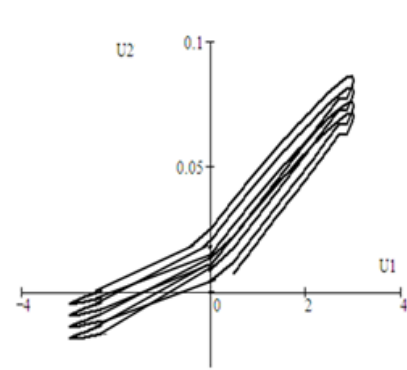


Рис. 8. График зависимости  $U_2=f(U_1)$ , при  $f = 20$  [кГц],  $L = 50$  [мГн],  $R = 2$  [кОм]

В программном пакете Multisim была выполнена схема RL-диодного ГДХ ( $R = 2$  кОм,  $L = 50$  мГн, D – 1N4531), представленная на рис. 9. Для реализации преобразования сопротивления в постоянное напряжение на выход ГДХ (out) подключен амплитудный детектор (рис. 10). Как первичный измерительный преобразователь резистивной физической величины использован переменный резистор R1.

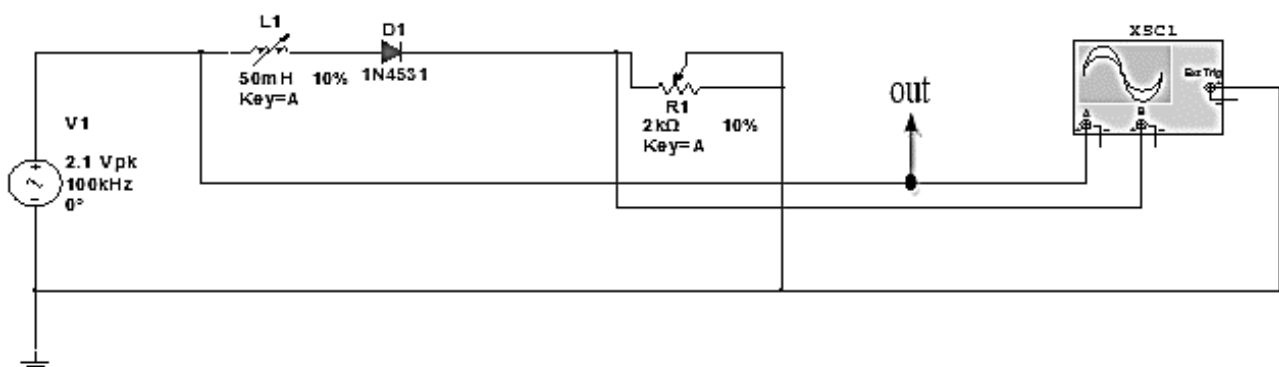


Рис. 9. Схема RL-диодного ГДХ

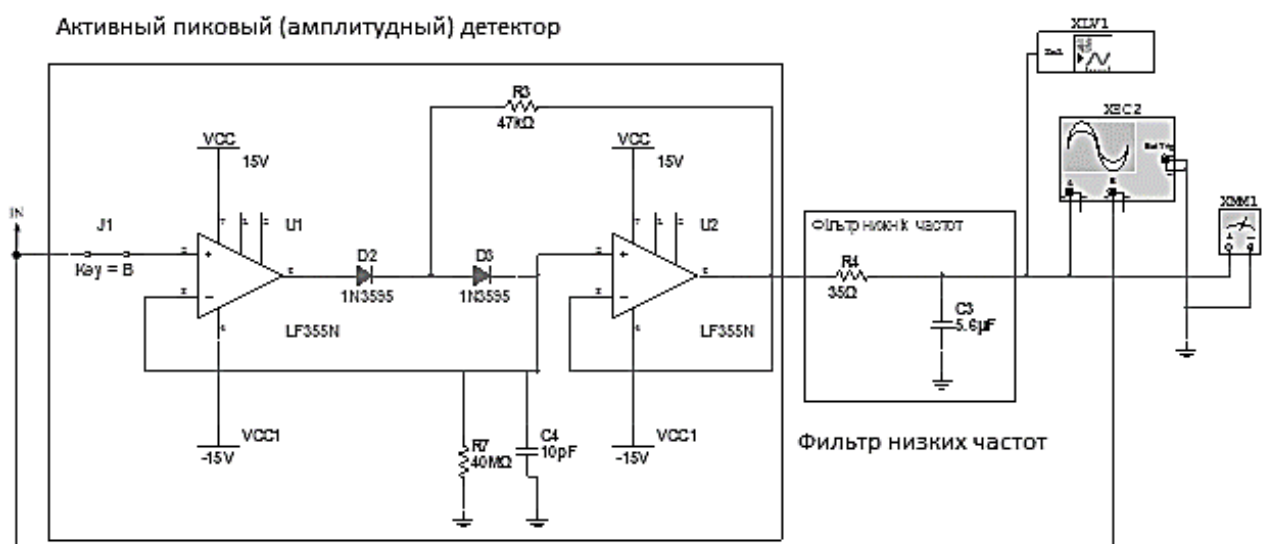


Рис. 10. Схема амплитудного детектора

На рис. 5, 6 построены графики зависимости выходного напряжения от сопротивления R1 та чувствительности напряжения к изменению сопротивления R1.

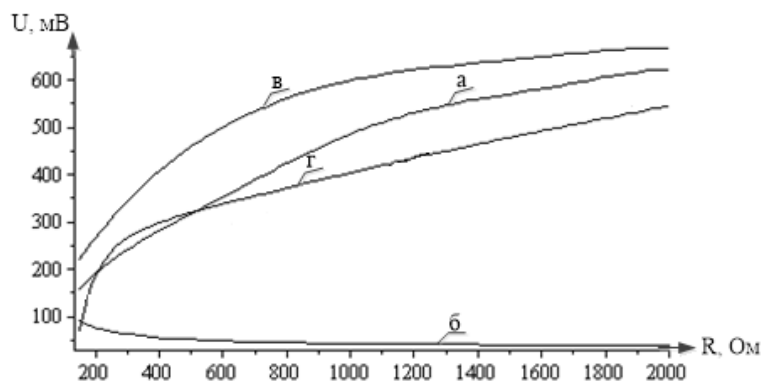


Рис. 5. Зависимости выходного напряжения от сопротивления  $R_1$ : а – при  $L=1500$  мкГн, б – при  $L=1000$  мкГн, в -  $L=800$  мкГн, г – при  $L=500$  мкГн

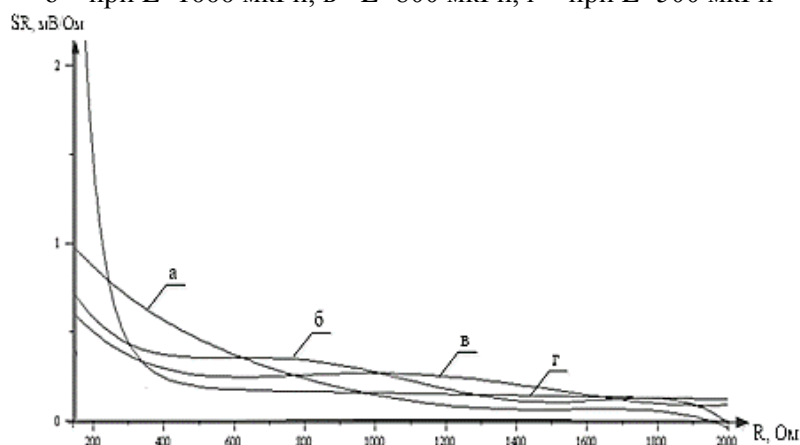


Рис. 6. Графики чувствительности: а – при  $L=1500$  мкГн, б – при  $L=1000$  мкГн, в -  $L=800$  мкГн, г – при  $L=500$  мкГн

## Выводы

1. Исследована возможность измерения резистивной физической величины с помощью ГДХ. Показано, что ГДХ на основе RL-диодной цепи имеет достаточно высокую чувствительность выходного напряжения к изменению сопротивления в диапазоне до 250 Ом, что может быть использовано при создании измерительных устройств на его основе.

2. Проведено математическое моделирование RL-диодной цепи, которое показало существенное влияние барьерной и диффузионной емкостей диода на возникновение детерминированно-хаотических колебаний в этой цепи.

## Литературные источники

1. Anishchenko V.S. Nonlinear Dynamics of Chaotic and Stochastic Systems. Tutorial and Modern Development. 2nd Edition. V.S. Anishchenko, V.V. Astakhov, A.B. Neiman, T.E. Vadivasova, L. Schimansky-Geier. Berlin, Heidelberg, 2007. – 460 p.
2. Паркер Т.С., Чжуа Л.О. Метод измерения с использованием свойств нелинейных динамических систем. //ТИИЭР. - 1987. – Т 75. - №8. - С. 6.
3. Воронов С.С., Колпакова Л.В., Кузнецов В.А. Метод измерения с использованием свойств нелинейных динамических систем. //Измерительная техника. - 1996. - №12. - С.16-18.
4. Воронов С.С., Колпакова Л.В., Кузнецов В.А. Метод хаотического генератора: подходы к диагностированию параметров нелинейных хаотических систем. //Измерительная техника. - 2000. -№4. - С.19-21.
5. W. Kucheruk, Z. L. Warsza, W. Sewastyanow, W. Mankowska Generator oscylacji chaotycznych o układzie RL-diода jako przetwornik rezystancja-napięcie. // Przegląd Elektrotechniczny, 2013, V. 10, p. 266-269.
6. V. Kucheruk, S.Sh. Katsyv, V.S. Mankovska, M.V. Mykhalko Research of the “Determined Chaos” phenomenon in the RL-Diode electric circuit of sinusoidal current // Proceeding the Sixth World Congress “Aviation in the XXI-st Century”, volume 1, September 23-25, Kyiv, 2014, p. 1.10.20-1.10.24.
7. У. Наундорф Аналоговая электроника. Основы, расчет, моделирование. Москва: Техносфера, 2008. – 472 с.